Proposition of a new Semantics for Standardized Tolerencing - Principle of its Verification on Coordinate Measuring Machine

Eric Pairel

PROPOSITION D'UNE NOUVELLE SEMANTIQUE POUR LE TOLERANCEMENT NORMALISE

PRINCIPE DE SON CONTROLE SUR MACHINE A MESURER TRIDIMENSIONNELLE

Eric Pairel
LMecA/CESALP - Université de Savoie
(Laboratoire de Mécanique Appliquée)
41 avenue de la Plaine, BP 806
74016 ANNECY Cedex, FRANCE

Résumé

La sémantique du tolérancement normalisé, c'est à dire sa signification par rapport aux surfaces réelles, rend difficile la synthèse d'une cotation fonctionnelle d'une part et, d'autre part, ne peut pas être correctement contrôlée, en particulier avec les Machines à Mesurer Tridimensionnelle (MMT).

Nous proposons une **nouvelle sémantique pour le tolérancement** basée l'association d'une **surface enveloppe** à la surface réelle.

Nous définissons la surface enveloppe de façon unique et générale comme étant la surface théorique «tangente» à la surface réelle du coté extérieur à la matière et telle que le volume entre elles soit minimal. En d'autres termes, nous proposons un critère d'association unique permettant de définir la surface enveloppe et que nous appelons le **critère du volume minimal**. Nous montrons les propriétés intéressantes de ce critère notamment du point de vue de son interprétation fonctionnelle.

Nous présentons ensuite une méthode, pour les **logiciels des MMT**, permettant le calcul de la surface théorique enveloppe suivant le critère proposé. Les performances de cette méthode et les résultats numériques obtenus sont comparés aux deux principaux critères d'association utilisés, celui des moindres carrés et celui du défaut de forme minimal (encore appelé minimax ou de Tschebyscheff).

Introduction

La sémantique du tolérancement normalisé est inspirée des moyens de contrôle traditionnels : Instruments de mesure de dimension (pied à coulisse, micromètre), éléments de posage (marbre, équerre, pige) et de contrôle (calibre). Cependant elle n'est pas très bien formalisée. L'exemple le plus significatif est la sémantique associée au tolérancement d'une dimension linéaire : Inspirée de la mesure par pied à coulisse ou micromètre, elle est basée sur la notion ambiguë de *dimension locale*.

Cette origine du tolérancement normalisé rend très difficile la synthèse d'une cotation fonctionnelle.

De plus, la sémantique normalisée ne peut pas être respectée par les nouveaux moyens de contrôle que sont les Machines à Mesurer Tridimensionnelles.

L'objet de cet article est de proposer une nouvelle sémantique pour le tolérancement normalisé, basée sur l'association d'une surface théorique à la surface réelle. Pour que la surface théorique soit représentative de la surface réelle, nous définissons un critère d'association général à toute surface et montrons comment il peut être calculé par le logiciel d'une MMT.

Principe du tolérancement normalisé

Le principe du tolérancement normalisé est de tolérancer individuellement chacune des surfaces élémentaires (plan, cylindre, cône...) composant la surface de la pièce.

Pour chaque surface élémentaire la norme distingue trois types de défauts : Un défaut de forme, de dimension et de position (dans cet article, le terme position recouvre les termes *position* et *orientation* utilisés par la norme).

L'objet de la cotation est de tolérancer ces trois défauts. La norme fournit pour cela deux moyens graphiques : Le *tolérancement dimensionnel*, représenté par une cote tolérancée, et le *tolérancement géométrique*, représenté par un *cadre de tolérance*.

La forme et la position sont tolérancées par le tolérancement géométrique.

La dimension, linéaire (diamètre d'un arbre) ou angulaire (angle entre deux plans sécants), est tolérancée par le tolérancement dimensionnel.

Il faut noter que ces trois défauts constituent un modèle de la réalité, car rien ne permet de les distinguer naturellement sur la surface réelle. Cela signifie qu'il est nécessaire de leur donner un sens par rapport à la surface réelle; ce que la norme appelle une *interprétation* et que nous préférons appeler la sémantique.

Sémantique normalisée du tolérancement

Présentation

Pour les dimensions linéaires, la tolérance dimensionnelle limite les *dimensions locales réelles (mesures entre deux points) de l'élément* [1] (Fig. 1.a). L'élément désigne soit une surface cylindrique soit une paire de surfaces nominalement planes et parallèles [1].

Pour les dimensions angulaires, la signification du tolérancement dimensionnel est très ambiguë. On remarque d'ailleurs que pour les surfaces coniques, la norme NF E 04-557 [2] ne tolérance pas l'angle mais seulement un défaut de forme.

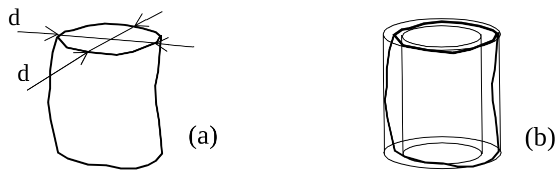

Fig. 1 : Dimension et Forme

Le défaut de forme est la distance maximale entre la surface réelle et une surface théorique en contact avec elle du coté extérieur de la matière. Selon la norme, la surface théorique doit être choisie de manière à minimiser cette distance. La surface théorique est donc associée à la surface réelle suivant le critère du défaut de forme minimal (distance maximale minimale), encore appelé critère minimax ou critère de Tschebyscheff. C'est le premier critère d'association utilisé par la norme.

La norme, dans sa présentation du défaut de forme, considère une autre surface théorique «parallèle» à la précédente (cylindre coaxial), en contact avec la surface réelle du coté intérieur de la matière (Fig. 1.b).

Par ailleurs, la norme offre un moyen de limiter le défaut de forme de la surface au travers de la tolérance dimensionnelle grâce à l'*exigence de l'enveloppe*. Cette exigence spécifie, qu'en plus des conditions sur les dimensions locales, la surface réelle doit respecter une surface théorique limite dont le dimension correspond à la dimension au maximum de matière autorisé par la tolérance dimensionnelle.

Si la position est tolérancé, la tolérance s'exprime par une *zone de tolérance* dans laquelle doit se trouver «*l'axe réel*» (Fig. 2.a).

Fig. 2 : Position tolérancé ou de référence

La notion «d'axe réel» n'est pas défini par la norme.

Si la position sert de référence, l'axe de référence qui doit être considéré est celui du cylindre théorique enveloppe de la surface réelle. Dans le cas d'un alésage, il s'agit du cylindre de diamètre maximal entrant dans l'alésage (Fig 2.b). C'est le deuxième critère utilisé par la norme. Il n'est utilisable que pour les surfaces caractérisée par une seule dimension linéaire (Cylindre et sphère).

Implications sur la cotation fonctionnelle

La difficulté ressenti par le dessinateur-projeteur lors de la cotation d'une pièce, est liée au fait que les trois tolérances ont des interactions entre-elles : La tolérance de position limite indirectement le défaut de forme de la surface (Fig. 2.a) et la tolérance de forme limite la tolérance de dimension, qui ne peut lui être supérieure (Fig. 1.b). Cependant il est impossible de déterminer l'effet cumulé de ces interactions car les trois défauts ne sont pas relatifs à la même surface théorique.

Remarque : On note ici que le *principe de l'indépendance*, présenté par la norme ISO 8015 [1] comme étant le principe de base pour l'interprétation des tolérances, a une portée très limitée !

Par ailleurs, la signification d'une tolérance dimensionnelle linéaire ne correspond a aucune condition fonctionnelle réelle. Il est parfois avancé qu'elle est utile lorsque la forme n'est pas fonctionnelle, en prenant pour exemple la condition de résistance mécanique. En fait, pour cette condition, la variation de la forme est plus influente que la variation de la dimension comme le souligne le professeur SRINIVASAN [3].

Implications sur le contrôle

L'interprétation en termes de dimensions locales d'une tolérance dimensionnelle linéaire présente plusieurs problèmes pour le contrôle :

- La notion de dimension locale est très difficile à définir simplement. Jusqu'à présent, elle n'est pas définie par les normes.

- La dimension locale peut ne pas être mesurable faute de matière (Exemple du diamètre d'un arbre avec un méplat).

- Elle est incompatible avec les techniques de contrôle sur MMT.

- Enfin, d'un point de vue plus théorique, il est impossible de garantir qu'aucune dimension locale réelle n'est hors tolérance étant donné qu'il y en a une infinité.

Le contrôle d'une tolérance de position suivant l'interprétation normalisée nécessite de «construire» l'*axe réel*. En pratique on préfère, comme cela est décrit dans les normes françaises relatives au contrôle, de NF E 10-105 à E 10-108 [4][5], contrôler de défaut de position de l'axe d'une pige ajustée dans l'alésage. La pige matérialise l'enveloppe de la surface.

En conclusion, la sémantique normalisée n'est pas fonctionnelle et conduit à des difficultés en métrologie.

Proposition d'une nouvelle sémantique

Présentation

Nous proposons que la forme, la dimension et la position soient relatives à la surface théorique qui enveloppe la surface réelle. Dans la suite de cet article, nous donnons une définition unique et générale de l'enveloppe théorique d'une surface.

Dans le cas d'un arbre, l'enveloppe est le cylindre théorique extérieur à la matière et de diamètre minimal :

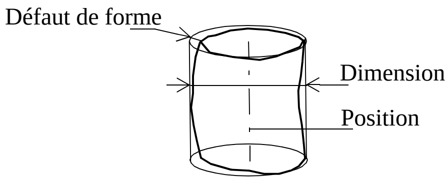

Fig. 3 : Nouvelle sémantique

La sémantique que nous proposons est la suivante :

- La tolérance dimensionnelle limite la dimension de l'enveloppe de la surface réelle : La dimension de l'enveloppe doit être dans la tolérance.

Notons que cette sémantique, à la différence de celle qui est normalisée, est aussi applicable aux dimensions angulaires comme l'angle d'un cône car la définition de l'enveloppe que nous proposons plus bas est générale.

- La tolérance de forme limite l'écart maximal de la surface réelle par rapport à l'enveloppe.

- La tolérance de position s'applique à l'élément géométrique qui caractérise la position de l'enveloppe : Axe du cylindre enveloppe, centre de la sphère enveloppe, axe et sommet du cône enveloppe. Nous appelons ces élément, les éléments positionnels. Dans le cas du plan, l'élément positionnel est le plan lui-même. En conséquence, suivant la sémantique proposée, une tolérance de position appliquée à une surface nominalement plane, concerne le plan enveloppe de celle-ci.

- Enfin, si la surface sert de référence, c'est également l'élément positionnel de l'enveloppe qui est considéré. Ce dernier point correspond à la norme.

Remarque : La sémantique proposée peut s'utiliser avec d'autre critères d'association pour définir la surface théorique associée; par exemple celui des moindre carrés. Cependant, celui que nous proposons d'adopter nous semble être le plus fonctionnel.

<u>Implications sur la cotation fonctionnelle</u>

Les trois tolérances, la dimension, la forme et la position, sont indépendantes entre elles tout en se référant à la même surface théorique :

La tolérance de position ne limite pas le défaut de forme de la surface.

La tolérance de forme ne limite pas la dimension de l'enveloppe.

La tolérance dimensionnelle concerne directement l'enveloppe de la surface de la surface permettant ainsi au dessinateur de maîtriser les jeux minimum et maximum dans les assemblages.

Remarque : Si l'enveloppe, dont on souhaite tolérancer la dimension, ne doit s'appliquer que sur une longueur restreinte de l'élément (exemple d'un arbre long), la norme NF E 04-552 [6] donne un moyen de limiter la zone dans laquelle on souhaite que s'applique la tolérance :

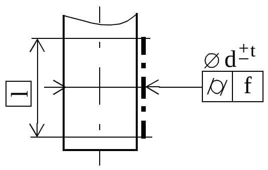

Fig. 4 : Tolérancement sur une zone restreinte

Ce dessin signifie, qu'en tous lieux de l'arbre, les tolérances de dimension et de forme doivent être vérifiées sur une l'enveloppe de longueur l.

<u>Implications sur le contrôle</u>

Par les moyens traditionnels, ces nouvelles interprétations ne posent pas plus de difficultés que les interprétations normalisées :

Pour les tolérances de position, les pratiques courantes (utilisation d'éléments rapportés) sont plus en conformité avec l'interprétation proposée qu'avec celle de la norme.

Pour les tolérances de forme, les méthodes normalisées permettent le contrôle du défaut de forme suivant l'interprétation proposée.

Pour les tolérances dimensionnelles linéaires, on peut utiliser des calibres de contrôle. L'utilisation des pieds à coulisse ou des micromètres ne permet pas de mesurer l'enveloppe.

Les MMT conviennent particulièrement à cette nouvelle sémantique. Cependant le critère des moindres carrés, utilisés par les logiciels de ces machines, conduit à une surface théorique passant au milieu des points palpés. Certains logiciels décalent cette dernière vers le point le plus à l'extérieur de la matière. Mais dans les deux cas la surface obtenue n'est pas la surface enveloppe.

Nous présentons dans la prochaine partie de cet article, un algorithme de calcul, pour les logiciels des MMT, permettant le calcul de la surface enveloppe.

<u>Définition générale de l'enveloppe</u>

<u>Définition proposée</u>

L'enveloppe d'une surface réelle élémentaire est la surface théorique, extérieure à la matière, qui minimise le volume entre elle et la surface réelle.

En d'autres termes, l'enveloppe est la surface théorique associée à la surface réelle suivant le **critère du Volume Minimal**.

Nous présentons plus bas sa forme mathématique.

Remarque : A notre connaissance, ce critère est original. Il n'a jamais été proposé.

<u>Comparaison avec les associations normalisées</u>

La norme décrit, pour chaque type de surface, comment doit être associée la surface théorique à la surface réelle lorsque celle-ci doit servir de référence. Seule la surface cylindrique fait l'objet d'une définition univoque.

Nous montrons ici que le critère proposé généralise toutes les associations données par la norme en les formalisant davantage.

- Pour les surfaces nominalement cylindriques, la norme précise que l'on doit considérer, pour un arbre, l'*axe du cylindre minimal circonscrit*. Autrement dit l'axe du cylindre, extérieur à la matière, de diamètre minimal.

Le critère du volume minimal est strictement équivalent au critère de dimension minimale / maximale défini par la norme. La démonstration est simple : Appelons v1 le volume intérieur de l'arbre et v2 le volume intérieur du cylindre circonscrit de diamètre d et de hauteur correspondant à celle de l'arbre. Le volume entre les deux surfaces est égale à la différence de ces deux volumes : v= v2 - v1. v1 étant une constante ainsi que la hauteur, pour minimiser ce volume, il faut minimiser le diamètre d du cylindre théorique.

- Pour les surfaces nominalement sphériques, la norme parle du *centre de la sphère enveloppe*.

Le critère du volume minimal permet d'obtenir la sphère de diamètre minimal (ou maximal). C'est donc conforme à la norme.

- Pour les surfaces nominalement conique, le critère est assez ambiguë : *Axe du cône s'adaptant le mieux à la surface réelle*.

Le critère du Volume minimal permet de définir de façon univoque l'enveloppe conique.

- Enfin pour les surfaces nominalement planes, le critère est également assez ambiguë : *Plan tangent à la surface réelle. Si le plan peut avoir plusieurs positions la position de référence est la position moyenne qui répartit les écarts* (NF E 04-554 [7]). Dans l'édition précédente de cette norme, le critère était celui du défaut de forme minimal : Plan tangent à l'extérieur de la matière qui minimise l'écart maximal avec la surface réelle.

Dans les cas courants de défauts de planéïte, les différents critères d'association conduisent à des surfaces peu différentes. Cependant, nous montrons sur la figure suivante que, dans des cas de défauts particuliers, le critère du volume minimal permet d'obtenir une position du plan plus représentative de la surface réelle que le critère du défaut de forme minimal.

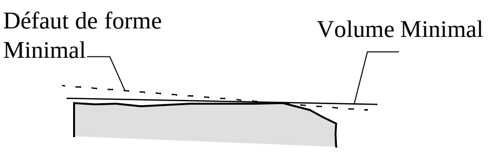

Fig. 5 : Association d'un plan

Expression mathématique du critère du Volume Minimal

On se donne une surface théorique initiale extérieure à la matière et assez proche de la surface réelle.

Soit e, l'écart entre un point P de la surface réelle et la surface théorique.

Soit ds, l'élément de surface entourant le point P; ds engendre un volume élémentaire dv= e ds.

Le volume compris entre les deux surfaces est alors: $V = \int_S e\,ds$

Les MMT permettent de connaître les surfaces réelles en un nombre fini de points {Pi}. A chaque point Pi on peut associer un élément de surface Δsi.

le volume est alors: $V \approx \sum_S e_i \Delta s_i$

Le critère d'association proposé consiste à minimiser ce volume avec la contrainte que la surface théorique reste à l'extérieur de la matière; autrement dit que les écarts ei restent positifs : $e_i \geq 0$

Il est possible, par un algorithme de «découpage» de la surface S, de calculer, pour chaque point palpé Pi, l'élément de surface Δsi l'entourant. Cependant il est plus simple d'imposer une répartition régulière des points palpés sur la surface réelle de manière à ce qu'ils aient tous le même élément de surface. Δsi devient alors une constante qu'il est possible de sortir du signe somme.

Le critère que l'on obtient alors est la minimisation de la somme des écarts, ceux-ci étant contraints à rester positif :

$$\text{Minimiser } \sum e_i$$
$$\text{sous le système de contraintes } \quad e_i \geq 0$$

Les écarts e_i sont fonctions de la variation de dimension de la surface théorique initiale ainsi que de son déplacement par rapport à la surface réelle.

Pour résoudre ce problème d'optimisation, nous utilisons le «modèle des petits déplacements», développé par les professeurs BOURDET et CLEMENT, qui permet de linéariser l'expression de l'écart ei en fonction des paramètres de déplacement et de dimension.

Remarque : Le critère obtenu, que nous pourrions appeler critère de la somme minimale des écarts, n'a jamais été proposé à notre connaissance. Il n'est vraisemblablement pas équivalent au critère de la somme minimale des valeurs absolues des écarts qui conduit à une surface passant au milieu des points et pour lequel SHUNMUMGAM [8] propose une méthode de calcul.

Modèle mathématique pour l'association d'une surface théorique à une surface palpée

Le modèle mathématique que nous présentons ici est dû aux Professeurs BOURDET et CLEMENT. Il se nomme le «modèle des petits déplacements» [9][10].

Les points palpés sont exprimés dans un repère de référence (repère de palpage).

On détermine une surface théorique initiale à partir des points palpés (par exemple pour le plan on choisit trois points parmi l'ensemble).

Pour chaque point palpé Pi, on détermine la normale à la surface théorique (ni), orientée vers l'extérieur de la matière, et le point théorique Mi appartenant à la surface.

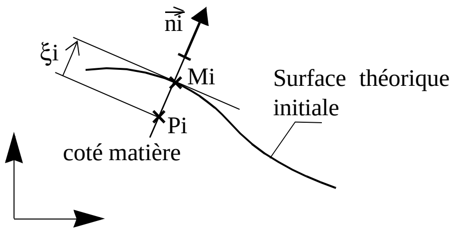

Fig. 6 : Position initiale de la surface théorique

L'écart initial entre la surface théorique et le point Pi est noté ξi.

Pour associer la surface théorique à la surface réelle, représentée par les points palpés {Pi}, suivant un critère donné, nous devons déplacer la surface théorique initiale et faire varier sa dimension.

La situation initiale de la surface théorique est très proche de sa situation optimale, ce qui permet de caractériser son déplacement (translation et rotation) par un torseur dont les éléments de réduction à l'origine du repère sont : $\{D\}_O = \begin{cases} \vec{\Omega} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \\ \overrightarrow{D_O} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \end{cases}$

$\vec{\Omega}$ est le vecteur de rotation et $\overrightarrow{D_O}$ représente le déplacement du point à l'origine due au déplacement de la surface théorique.

Cette modélisation du déplacement de la surface permet de calculer le déplacement des points Mi par la relation : $\overrightarrow{D_{Mi}} = \overrightarrow{D_O} + \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{OMi}$

Avec l'hypothèse supplémentaire que le déplacement de Mi est petit devant le rayon de courbure de la surface en Mi, on peut écrire que le nouvel écart entre le point palpé Pi et la surface est : $e_i = \xi_i + \overrightarrow{D_{Mi}} \cdot \vec{n_i}$

Il est nécessaire de compléter le modèle afin de pouvoir prendre en compte la petite variation de dimension de la surface théorique initiale.

La variation de dimension, noté r, se traduit localement au point Pi par le «décalage» de la surface théorique d'une petite quantité algébrique égale à $\rho_i \cdot r$

Dans le cas de l'association d'un cylindre, si r représente la variation de son rayon, alors ρ_i est constant quelque soit le point et vaut 1.

L'équation de l'écart devient alors : $e_i = \xi_i + \overrightarrow{D_{Mi}} \cdot \vec{n_i} + \rho_i \cdot r$

En notant les coordonnées de n_i et de Mi de la façon suivante : $\vec{n_i} = \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{pmatrix}$ $\quad \overrightarrow{OMi} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix}$

Le développement de e_i donne l'expression linéaire suivante:

$$e_i = \xi_i + (a_i \cdot u + b_i \cdot v + c_i \cdot w + Li \cdot \alpha + Mi \cdot \beta + Ni \cdot \gamma) + \rho_i \cdot r$$

Où Li, Mi et Ni sont les composantes du vecteur : $\overrightarrow{OPi} \wedge \vec{n_i}$

Remarque : En raison du théorème de l'équiprojectivité, la quantité $\overrightarrow{D_{Mi}} \cdot \vec{n_i}$ est aussi égale à la quantité $\overrightarrow{D_{Pi}} \cdot \vec{n_i}$. Cette propriété est avantageuse car elle permet d'éviter le calcul des coordonnées du point théorique Mi, en prenant directement celles du point palpé Pi pour calculer l'écart e_i.

Les auteurs ont d'abord utilisé ce modèle pour l'association suivant les moindres carrés. La valeur minimale de la somme des écarts au carré est obtenue lorsque les dérivées partielles de cette somme par rapport aux variables s'annulent. La solution est obtenue par la résolution d'un système d'équations de Cramer.

Ensuite, ils l'ont utilisé pour le critère du défaut de forme minimal et celui du diamètre maximal/minimal pour les cylindres inscrit/circonscrit.

Dans les deux cas, le problème à résoudre est un Programme Linéaire.

Calcul de la surface enveloppe

A partir de l'expression précédente de ei, la fonction objectif, correspondante au critère du volume minimal, s'écrit :

$$\begin{aligned} \sum e_i = {} & u\sum a_i + v\sum b_i + w\sum c_i + \\ & \alpha\sum Li + \beta\sum Mi + \gamma\sum Ni + \\ & r\sum \rho_i + \sum \xi_i \end{aligned}$$

Le problème consiste à minimiser cette fonction linéaire sous le système de contraintes formé des inéquations linéaires $\{e_i \geq 0\}$. On a donc un programme linéaire à résoudre.

Nous avons développé un algorithme de résolution des programmes linéaires. L'algorithme est fondé sur la méthode du simplexe. Il a été développé pour les besoins d'un travail plus important dont on pourra trouver les idées dans [11].

Comparaisons numériques des critères d'association

L'algorithme de résolution, que nous avons développé nous a permis d'associer un plan ou un cylindre suivant les quatre critères ci-dessous :

- Défaut de forme minimal : Minimiser ei_{Max}. On a un Programme Linéaire à 2 N inéquations (N étant le nombre de points palpés). La surface associée est extérieure à la matière.

- Moindres carrés : On a un système de Cramer d'ordre trois pour le plan et cinq pour le cylindre. Ce système est transformé en programme linéaire (fonction objectif nulle) de manière à être résolu par le même algorithme que les autres critères. La surface est décalée vers le point le plus à l'extérieur de la matière.

- Diamètre optimal : Minimiser r avec $\{e_i \geq 0\}$. On a un programme linéaire à N inéquations. Le cylindre associé est extérieur à la matière.

- Somme minimale des écarts (critère proposé) : Minimiser $\sum e_i$ avec $\{e_i \geq 0\}$. On a un programme linéaire à N inéquations. La surface associée est extérieur à la matière.

Nous avons pu vérifier la justesse des résultats numériques donnés par l'algorithme de résolution en utilisant des surfaces palpées fictives de dimension enveloppe et de défaut de forme connus à priori.

Des différents tests que nous avons menés sur une douzaine de surfaces palpées réelles (de 8 à 16 points par surface ayant des dimensions inférieures à 50mm), il ressort que :

- Le critère du défaut de forme minimal est très long à calculer (plus d'itérations de l'algorithme sur plus de contraintes : Une seconde sur un PC DX2-66 pour un cylindre en 16 points). L'obtention d'un défaut de forme minimal se fait souvent au détriment d'un diamètre plus petit pour les alésages, ou plus grand pour les arbres, que le diamètre enveloppe.

- Le critère des moindres carrés est très rapide à calculer. L'association obtenue est assez proche du critère de défaut de forme minimal, mais le diamètre du cylindre associé décalé est encore plus petit, pour un alésage, ou plus grand, pour un arbre, que celui obtenu par ce dernier critère. L'écart par rapport au diamètre enveloppe est donc encore plus grand.

- Le critère de la somme minimale des écarts (critère proposé) est beaucoup plus rapide que celui du défaut de forme minimal (Quelques dixièmes de seconde pour le cylindre palpé en 16 points). Le diamètre obtenu correspond bien au diamètre enveloppe.

- Le critère du Diamètre optimal est légèrement plus rapide que le critère proposé. Mais il conduit à un défaut de forme trop grand (plus grand que tous les autres critères). Ceci provient du fait qu'il ne tient compte que des points les plus à l'extérieur.

En conclusion, le critère proposé conduit à des résultats numériques qui sont les plus proche de la réalité (diamètre enveloppe, défaut de forme) avec un temps de calcul tout à fait acceptable.

Conclusion

La sémantique normalisée est basée sur les pratiques traditionnelles de contrôle en atelier (micromètres, marbres...). La conséquence de cette origine est qu'il est très difficile de formaliser cette sémantique. On note d'ailleurs la complexité des définitions proposées dans ce but, en particulier pour la notion de dimension locale.

La sémantique normalisée n'est adaptée au tolérancement fonctionnel. De plus, elle n'est pas contrôlable en toute rigueur avec les Machines à Mesurer tridimensionnelles.

Nous avons proposé dans cet article une nouvelle sémantique pour le tolérancement, basée sur l'association d'une enveloppe théorique à la surface réelle.

Elle est parfaitement adaptée au contrôle sur Machine à Mesurer Tridimensionnelle surtout si on utilise le critère d'association du «volume minimal» défini dans cet article au lieu du critère des moindres carrés.

Enfin, la sémantique proposée simplifie nettement l'analyse et la synthèse du tolérancement, sans pour autant remettre en cause la syntaxe de la cotation, c'est à dire sa représentation graphique. Plus simple et plus cohérente, elle constitue une base rigoureuse pour le développement des méthodes de cotation fonctionnelle.

Références

[1] E04-561 «Principe de tolérancement de base»; Norme expérimentale AFNOR, Oct. 1991; Reproduction intégrale de la norme ISO8015:1985.

[2] NF E 04-557 «Cotation et tolérancement - Cône»; Norme AFNOR, Déc. 1991. Correspond à la norme ISO 3040:1990.

[3] V. Srinivasan, «Recent Effort in Mathematization of ASME/ANSI Y14.5M»; Proceedings of 3rd CIRP Seminars on Computer Aided Tolerancing, pp223-232, Avril 1993.

[4] NF E 10-105 «Méthodes de mesurage dimensionnel - Sixième partie : Etablissement des références spécifiées»; Norme expérimentale AFNOR, Déc. 1990.

[5] E 10-108 «Méthodes de mesurage dimensionnel - Neuvième partie : Ecarts de localisation»; Norme AFNOR, Déc. 1992.

[6] NF E 04-552 «Tolérancement Géométrique. Généralités, définitions, symboles, indications sur les dessins»; Norme AFNOR, Nov. 1983. Correspond à la norme ISO 1101:1983

[7] NF E 04-554 «Cotation et tolérancement - Références et systèmes de référence pour tolérances géométriques»; Norme AFNOR, Déc 1988.

[8] M.S. Shunmugam, «New approach for evaluating form errors of engineering surfaces»; Journal of Computer-aided-design, Vol. 19, No 7, Sept. 1987.

[9] P. Bourdet, «Contribution à la mesure tridimensionnelle: Modèle d'identification géométrique des surfaces; Métrologie fonctionnelle des pièces mécaniques; Correction géométrique des machines à mesurer tridimensionnelles»; Thèse de l'université de Nancy I (France), 1987.

[10] P. Bourdet, A. Clement, «A study of optimal-criteria identification based on the small-displacement screw model»; Annals of the CIRP, Vol. 37/1/1988.

[11] E. Pairel, D. Duret, M. Giordano, «Verification of a group of functional surfaces on Coordinate Measuring Machines»; Annals of the XIII IMEKO world congress: From measurement to innovation, Vol. 3, pp1670-1675, Sept. 1994, Turin (Italy).